

Р.С. Грабовський, М.П. Мазур, В. Хабінський, А.В. Грицанчук

Івано-Франківський національний технічний університет нафти та газу

Abstract

For long-term operation of main oil and gas pipeline steels the technique of deterring the critical crack growth resistance of pipeline steels by investigation using experimentally obtained diagram of "force-deflection" samples destruction was suggested. The sizes of through critical cracks have been calculated and the initial sizes and the shape of crack-like defects for the investigated main gas and oil pipelines were evaluated. The obtained data can serve as a basis for the interpreting detected crack-like defects during technical diagnostics

Аналіз масштабних аварій, які виникали на магістральних газопроводах України у 2003–2007 роках, засвідчив, що характерною причиною таких руйнувань було утворення тріщиноподібних дефектів довжиною 0,45 – 0,65 м та глибиною 6 – 12 мм за механізмом корозійного розтріскування під напругою (стрес-корозії) внаслідок пошкодження захисного покриття труб, високої корозійної активності ґрунтів та порушення режимів електрохімічного захисту на аварійних ділянках траси [1].

Так, у квітні 2003 р. на магістральному газопроводі “Уренгой–Помари–Ужгород” (ділянка КС “Ставище”– КС “Іллінці”) діаметром 1420 мм стався розрив газопроводу. Згідно з висновком Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона руйнування магістрального газопроводу відбулося внаслідок корозійного розтріскування під напругою (стрес-корозії) металу труби, яке сталося вперше в практиці експлуатації газопроводів в Україні. Причиною руйнування була тріщина глибиною 8 мм та довжиною 650 мм. Для відновлення магістрального газопроводу було замінено понад 80 м труби.

Незважаючи на проведені значні комплексні обстеження, на магістральному газопроводі “Уренгой–Помари–Ужгород” у травні 2007 р. у районі КС “Ставище” внаслідок корозійного розтріскування під напругою (стрес-корозії) металу труби сталася аварія з розривом трубопроводу. У цьому випадку причиною руйнування була тріщина глибиною 6,8 мм та довжиною 470 мм. Причиною аналогічної аварії, що трапилася у грудні 2007 р. в районі КС “Іллінці” (рис. 1), була тріщина глибиною 11,8 мм та довжиною 600 мм [1].

Аналіз аварійних ситуацій, що виникають у процесі експлуатації газопроводів, засвідчує можливість реалізації двох сценаріїв . У першому випадку спостерігається розгерметизація труби, другий випадок характеризується катастрофічним (лавинним) руйнуванням трубопроводу, яке інколи сягає від кількох десятків метрів до декількох кілометрів [Помилка! Джерело посилання не знайдено.]. Визначальною умовою реалізації одного з двох сценаріїв є критичний розмір наскрізного тріщиноподібного дефекту, який залежить від багатьох факторів (робочого тиску, розмірів труби, низької температури транспортованого продукту, наявності залишкових напружень, термічного та деформаційного старіння, характеру зовнішнього середовища, тощо).

У зв’язку з цим, визначення критичних розмірів наскрізних тріщиноподібних дефектів та прогнозування умов неконтрольованого руйнування дефектних труб магістральних газопроводів є актуальною науково-технічною проблемою.

Метою даної роботи є оцінка умов руйнування магістрального газопроводу тривалої експлуатації, що ґрунтується на підходах механіки руйнування.

Методика передбачала реалізацію двох етапів дослідження. На першому етапі експериментально визначали критичну тріщиностійкість досліджуваної трубної сталі. Другий етап передбачав розрахункову оцінку можливої реалізації катастрофічного руйнування газопровідної труби з наявною наскрізною тріщиною.

Слід зауважити, що трубні сталі характеризуються високою пластичністю [2], тому для визначення їх опору поширення тріщини використовувати методи лінійної механіки руйнування не коректно.

Оцінюючи цілісність трубопроводу з наскрізною тріщиною, слід однак мати на увазі, що початок розповсюдження наскрізної тріщини у стінці труби необхідно оцінювати за енергетичним критерієм руйнування: тріщина починає рости, якщо інтенсивність енергії J , що звільнилася, досягає критичної величини J_c ,

$$J_* = J_c. \quad (1)$$

Критичну тріщиностійкість J_{Ic} визначали дослідним шляхом згідно з методикою визначення характеристики тріщиностійкості матеріалів при згині зразків з прямокутним перерізом, використовуючи експериментально одержану діаграму руйнування зразків “зусилля-прогин”, за умови коли зусилля навантаження досягає максимальної величини і фіксується підростання тріщини.

Для визначення критичної статичної тріщиностійкості металу трубної сталі використовували балкові зразки прямокутного перерізу товщиною $t = 10$ мм, висотою $b = 14$ мм та довжиною $l = 150$ мм. При цьому коректність застосування J -інтегралу визначалась умовою

$$b > \frac{25 \cdot J_{Ic}}{0,5 \cdot (\sigma_{0,2} + \sigma_B)}. \quad (2)$$

Випробування проводили на універсальній розривній машині FP-100/1. Швидкість навантаження зразка становила 1 мм/хв і залишалася постійною протягом усіх випробувань.

Експериментальну процедуру починали із заміру вихідних розмірів робочого перерізу зразка і відстаней між опорами ($L = 4,5 \cdot h$). Зразок встановлювали на навантажувачий пристрій і закріплювали давачі прогину. Здійснивши балансування вимірювальної апаратури, навантажували зразок до втрати ним несучих властивостей із одночасним записом діаграми руйнування (рис. 3). Після експерименту проводили заміри зламу поверхні деформування (руйнування) зразка та визначали її площу S (рис. 4) згідно з рівнянням

$$S = (h - l^*) \cdot b. \quad (3)$$

За даними експерименту визначали роботу руйнування (заштрихована область діаграми на рис. 2)

$$A = \int_0^{f_{max}} P(f) df. \quad (4)$$

Величину J_{Ic} визначали як роботу A , витрачену на деформування зразка з наведеною тріщиною, як елемента конструкції, при якій він вичерпує свої несучі властивості, віднесені до нетто площі деформованої поверхні зразка S (рис. 5)

$$J_c = \frac{A}{S}.$$

Крім того, обчислюючи критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Jc} , враховували ту обставину, що він має розмірність $\text{МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$. Оскільки розміри конструктивних елементів подавали у міліметрах, то при розрахунку K_{Jc} одержаний результат множили на $\sqrt{10^{-3}}$.

Характеристики критичної тріщиностійкості представили критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень K_{Jc} , що визначали за допомогою рівняння [2], в якому досягнута умова маломасштабної плинності в умовах плоскої деформації

$$K_{Jc} = \sqrt{\frac{J_c \cdot E}{(1 - \mu^2)}}, \quad (5)$$

де J_{Ic} – критична тріщиностійкість; E – модуль Юнга ($E = 10^{11}$ Па);

μ – коефіцієнт Пуассона (для низьколегованих сталей $\mu = 0,3$).

Розрахункову оцінку можливої реалізації катастрофічного руйнування газопровідної труби з наявною наскрізною тріщиною провели використовуючи запропонований критерій [3, 4], за яким можна визначити критичні розміри $2a_c$ поздовжньої наскрізної тріщини (рис. 5, а):

$$a_c = \frac{1}{\pi} \cdot \left(\frac{K_{Jc}}{F_I \cdot \sigma_p} \right)^2, \quad (6)$$

де σ_p – максимальні розтягувальні напруження, $\sigma_p = \frac{P_{max} R}{t}$, $\lambda = \frac{a_{K_I}}{\sqrt{R \cdot t}}$; a_{K_I} –

півдовжина наскрізної тріщини;

$$F_I = 1 + 0,072449 \cdot \lambda + 0,64856 \cdot \lambda^2 - 0,2327 \cdot \lambda^3 + 0,038154 \cdot \lambda^4 - 0,0023478 \cdot \lambda^5.$$

За умови коли розмір наскрізної тріщини рівний або більший від критичного розміру $2a_c$ поздовжньої наскрізної тріщини, виникають випадки аварійних ситуацій [1], коли тріщина, виходячи на поверхню труби, поширюється вздовж її осі та призводить до її подальшого розриву (рис. 5, б).

Цілісність газопроводу з наскрізною тріщиною (рис. 5, а) буде забезпечена за умови, коли розмір наскрізного дефекту менший від критичного розміру $2a_c$ поздовжньої наскрізної тріщини. У цьому випадку [5] можливе утворення свища – наскрізного отвору при якому відсутні умови для катастрофічного руйнування газопровідної труби, а можливий лише витік газу.

Матеріалом дослідження є фрагмент труби магістрального газопроводу “Шебелинка-Полтава-Київ” (720×14), яка експлуатувалася 41 рік. Хімічний склад досліджуваної сталі наступний: (0,16–0,22 % C; 0,20–0,40 % Si; 0,7–1,00 % Mn; ≤ 0,30 % Cr; ≤ 0,30 % Cu и ≤ 0,30 % Ni

Механічні характеристики тривало експлуатованої трубної сталі (табл. 2) визначались за стандартною процедурою випробувань п’ятикратних циліндричних зразків на розтяг.

Таблиця 2 – Механічні характеристики сталі 19Г

σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
481,5	328,0	22,7	57,3

Оцінку умов, за яких відбувається руйнування металу газопровідної труби, здійснювали, експериментально визначаючи величину J_c . Для цього з котушки труби магістрального газопроводу вирізали п’ять зразків розміром 150,0×10,0×14,0 мм (рис. 2).

При цьому визначали роботу A (площа під діаграмою деформування, рис. 5), витрачену на деформування зразка з попередньо утвореною тріщиною $l_{сер} = 0,45 \cdot h$ як елемента конструкції, при якій він втрачає свої несучі властивості, віднесену до нетто площі деформованої поверхні зразка S_f (рис. 4).

Характеристики критичної тріщиностійкості (табл. 3) у роботі представлені критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень K_{Jc} , який обчислювали за допомогою рівняння (5).

За допомогою рівняння (6) визначено величину критичних розмірів $2a_c$ поздовжньої наскрізної тріщини ($2a_c = 344$ мм) для труби магістрального газопроводу “Шебелинка–Полтава–Київ”, що знаходиться в повітряному середовищі.

Аналіз результатів дослідження трубної сталі 17Г1С, представлених у роботі [Помилка! Джерело посилання не знайдено.], дає підставу стверджувати, що вплив ґрунтової води призводить до зменшення критичних розмірів поздовжньої наскрізної тріщини на ~15%.

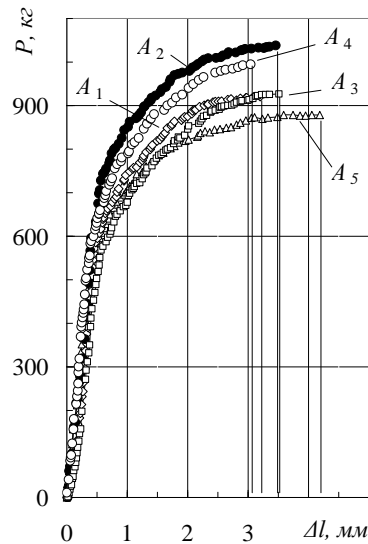


Рисунок 6 – Діаграма деформування $P-\Delta l$ зразків з фрагменту газопровідної труби

Таблиця 3 – Значення критичних коефіцієнтів інтенсивності напружень K_{Jc}

Зразок	$K_{Jc}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	$K_{Jc}^{сер} \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
1	263,45	282,91
2	294,60	
3	279,37	
4	267,03	
5	310,09	

Таким чином, наскрізні дефекти довжиною понад 300 мм є потенційно небезпечні, оскільки можуть спричинити катастрофічне руйнування газопроводу в реальних експлуатаційних умовах.

Висновки: Запропоновано методику оцінювання умов катастрофічного руйнування тривало експлуатованого газопроводу, яка на базі експериментально одержаних діаграм руйнування зразків “зусилля-прогин” враховує процеси старіння та деградації в тривало експлуатованих трубопровідних сталях та за критерієм тріщиностійкості дозволяє розраховувати критичні розміри наскрізної тріщини ($2a_c$). Одержані числові дані можуть слугувати базою для інтерпретації тріщиноподібних дефектів, виявлених у процесі технічного діагностування тривало експлуатованих газопроводів.

1. Красовський А.Я. Оцінка залишкового ресурсу трубопроводу, ушкодженого стресс-корозією / А.Я. Красовський, І.В. Ориняк, І.В. Лохман // Трубопровідний транспорт. – 2011. – № 2 (68). – С. 18-21.
2. Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-техн. посіб. у 3-х томах / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин; під заг. ред. В. В. Панасюка. – Івано-Франківськ–Львів: Івано-Франківський націон. техн. ун-т нафти і газу, 2012. – Т. 3. – 434 с.
3. *Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідн. посіб.* / За заг. ред. В.В. Панасюка. – Том 13: Працездатність матеріалів і елементів конструкцій з гострокінцевими концентраторами напружень / І.М. Дмитрах, Л. Тот, О.Л. Білий, А.М. Сиротюк. – Львів: СПОЛОМ, 2012. – 316 с.
4. Грабовський Р.С. До оцінки катастрофічного руйнування трубопроводу з тріщиноподібними дефектами / Р.С. Грабовський, В.С. Лужецький // Наукові нотатки: міжвуз. зб. – Луцьк: Луцьк. держ. техн. ун-т, 2006. – Вип. 19. – С. 56–63.
5. Смоляк Т. І. Розрахунок міцності газопроводів з корозійними дефектами / Т. І. Смоляк, І. І. Капцов, В. І. Холодов [та ін.] // Нафтова і газова промисловість. – 2005. – № 4. – С. 31-33.